УДК 004.4:004.7:621.391

SLODRIFT: ПРИКЛАДНА РЕАЛІЗАЦІЯ АЛГЕБРИ ПОЛІТИК І FRP-КЕРУВАННЯ ДЛЯ MQTT V5 У NB-IOT/LORAWAN

Ніконоров А.О.
Національний технічний університет України "Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського"
Україна, Київ
ponchikd97@gmail.com, https://orcid.org/0009-0008-8636-2737

Анотація. *У роботі запропоновано реалізацію підходу, у якому адаптація телеметрії моделюється як алгебра композиційних політик із FRP-керуванням параметрами каналу. Шлюз SLOdrift поєднує оператори Encode/Delta/Batch/Throttle/QoS з властивостями MQTT v5 (Receive Maximum, Message Expiry, Topic Alias) і забезпечує збіжну настройку, що обмежує черги та знижує хвостові затримки у вузькосмугових мережах. Наведено формалізацію оновлень, постановку експериментів і підсумкові результати.*

Ключові слова: *MQTT v5; алгебра політик; FRP; NB-IoT; LoRaWAN; CBOR; Protobuf; дельта-кодування; пакетування; pacing.*

Вступ. LPWAN-технології (NB-IoT, LoRaWAN) дозволяють збирати телеметрію за низького енергоспоживання, але мають жорсткі обмеження ефірного часу, розміру кадрів і підвищені RTT. Статичні конфігурації форматів та інтервалів призводять до розбалансування черг і зривів SLO. Необхідний підхід, який поєднує композиційний опис перетворень над потоками з формальними гарантіями стабільності [1-2].

Мета дослідження. Втілити алгебру політик з реактивною (FRP) моделлю каналу у вигляді шлюзу SLOdrift, узгодити її з механізмами MQTT v5 без змін брокера і продемонструвати збіжність налаштувань та зменшення хвостових затримок за рахунок Encode/Delta/Batch/Throttle/QoS [3].

Основна частина. Алгебра політик і FRP-модель може бути представлена таким чином. Позначимо через p_t вектор параметрів політики конвеєра: частота публікацій r_t, розмір вікна пакетування w_t, гранична кількість «in-flight» повідомлень W_t, параметри серіалізації k_tтощо. Канал подаємо як сигнальні функції в парадигмі FRP:$RTT_t, loss_t, duty_t$. Оновлення обчислюємо за контрактним правилом, що пригнічує осциляції та узгоджується з backpressure.

$$p_{t+1} = (1-\alpha)\cdot p_t + \alpha \cdot \Phi(p_t, RTT_t, loss_t, duty_t), 0 < \alpha < 1, Lip(\Phi) = \lambda < 1$$

де Φ — політика оновлення (зменшення r при зростанні RTT та loss, збільшення w за стабільного каналу), α — коефіцієнт згладжування; контрактність Φ гарантує збіжність p_t до фіксованої точки.

$$\Delta V = \mathbb{E}[V(q_{t+1}) - V(q_t)|state_t] \le -\varepsilon \cdot \| q_t \| + C, \quad \text{за умови } W_t \le ReceiveMaximum$$

де V(q) —функція Ляпунова довжини сумарних черг, ε > 0; обмеження in-flight повідомлень W_t узгоджується з MQTT v5 Receive Maximum і забезпечує від'ємний дрейф при допустимому навантаженні.

SLOdrift реалізовано як stream-конвеєр: Encode→Delta→Batch→Throttle→QoS. Encode підтримує JSON/CBOR/Protobuf; Delta надсилає лише змінені поля; Batch агрегує події у фіксованих вікнах; Throttle узгоджує темп із Receive Maximum; модуль QoS встановлює MQTT v5 властивості (Message Expiry, Topic Alias). Кожен етап інструментовано метриками, що дає змогу вимірювати латентність етапів та коефіцієнт корисності Delta/Batch [4].

Експериментальна постановка: (i) NB-IoT (емуляція tc netem для RTT 1–10 с, втрат і джитерів), (ii) LoRaWAN EU868 (ChirpStack/The Things Stack) з обмеженнями duty-cycle та ADR, (iii) брокери MQTT v5 (Mosquitto/HiveMQ CE). Сценарії: періодична телеметрія (1/5/60 с), імпульсні події (10 msg/c), state-delta потоки (5–20% змін). Метрики: p95/p99 затримка, bytes/day, goodput, глибина черг, частка застарілих публікацій (табл. 1).

Таблиця 1. Тестові середовища та сценарії навантаження

Середовище	Параметри каналу	Сценарії трафіку	Метрики
NB-IoT (емуляція tc netem)	RTT 1–10 с, втрати bursty, обмежений goodput	Періодична телеметрія (1/5/60 с), імпульсні події (10 msg/c)	p95/p99 затримка, goodput, queue depth, bytes/day
LoRaWAN EU868 (ChirpStack/TTS)	Duty-cycle, ADR, обмеження кадру	Періодична + Delta, агрегування Batch	bytes/day, втрати, p95/p99
Брокер MQTT v5 (Mosquitto/HiveMQ CE)	Receive Maximum, Message Expiry, Topic Alias	Пріоритизація подій, pacing, QoS 0/1	retries, expiry hits, in-flight

Результати та обговорення. Перехід з JSON до CBOR/Protobuf зменшує обсяг передавання; увімкнення Delta+Batch додатково скорочує bytes/day і згладжує пікові навантаження, знижуючи p95/p99. Обмеження W_t і pacing стабілізують in-flight черги без втрат goodput, а Message Expiry зменшує частку застарілих публікацій [1-4].

Висновки. Практичне втілення алгебри політик і FRP-керування у SLOdrift узгоджується з механізмами MQTT v5 і забезпечує керовану збіжність параметрів, стабілізацію черг та зменшення хвостових затримок у NB-IoT/LoRaWAN. Подальша робота — автоматизація вибору політик на основі онлайн-оцінок каналу та валідація на польових трасах.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

[1] Jesus, B., Lins, F., & Laranjeiro, N. (2025). An approach to assess robustness of MQTT-based IoT systems. Internet of Things, 31(4), 101590. https://doi.org/10.1016/j.iot.2025.101590

[2] Anderson, C. J., Foster, N., & Silva, A. (2014). NetKAT: Semantic foundations for networks. Proceedings of the 41st ACM SIGPLAN-SIGACT Symposium on Principles of Programming Languages, 113–126. https://doi.org/10.1145/2578855.2535862

[3] Uchida, N., Endo, S., Ishida, T., Yuze, H., & Shibata, Y. (2022). Enhanced MQTT method with IoT data priority controls for scalability and reliability on early landslide warning system. In International Symposium on Mobile Internet Security (pp. 257–267). Springer. https://doi.org/10.1007/978-981-99-4430-9_19

[4] Popereshnyak, S., Suprun, O., Suprun, O., & Wieckowski, T. (2018). IoT application testing features based on the modelling network. In 2018 XIV-th International Conference on Perspective Technologies and Methods in MEMS Design (MEMSTECH) (pp. 127–131). IEEE. https://doi.org/10.1109/MEMSTECH.2018.8365717

Nikonorov A.O.

SLOdrift: Practical Policy Algebra Implementation and FRP Control for MQTT v5 in NB-IoT/LoRaWAN

Abstract. *The paper proposes an implementation of an approach in which telemetry adaptation is modeled as an algebra of compositional policies with FRP-based control of channel parameters. The SLOdrift gateway combines the operators Encode, Delta, Batch, Throttle, and QoS with MQTT v5 features (Receive Maximum, Message Expiry, Topic Alias) and provides convergent tuning that limits queue growth and reduces tail latency in narrowband networks. The formalization of updates, experimental setup, and final results are presented.*

Keywords: *MQTT v5; policy algebra; FRP; NB-IoT; LoRaWAN; CBOR; Protobuf; delta encoding; batching; pacing.*